

Versenyautó aerodinamikai elemeinek fejlesztése AI segítségével

Improving race car aerodynamics elements with AI

CHUDI Levente Zsolt¹ BSc hallgató, **DR. MOLNÁR Ildikó**² okl. gépészmérnök, egyetemi docens

¹Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet
H-1081 Budapest, Népszínház u. 8., Telefon: +36 1 666 5319,
Email: chudi.levente@stud.uni-obuda.hu.

²Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet
H-1081 Budapest, Népszínház u. 8., Telefon: +36 1 666 5319,
Email: molnar.ildiko@bgk.uni-obuda.hu.

Abstract

Within the aerodynamic package of a race car, the design process of the front wing and the Venturi tunnel will be presented. The design will investigate how well the freely available Open AI-ChatGPT 4.0 and Google-Gemini 2.0 can support such an aerodynamic design and development process. We try to achieve an appropriate ratio of downforce to drag force generated by the wing at lower cruise speeds. We consider the relationship between the CoP (centre of pressure) and CoM (centre of mass) in terms of flight dynamics. The CAD model was created using SolidWorks and the CFD simulations were performed using Ansys CFD software.

Keywords: aerodynamics, CAD model, Open AI, Venturi-tunnel

Kivonat

Egy versenyautó aerodinamikai csomagján belül az első szárny és a Venturi-csatorna tervezési folyamata kerül bemutatásra. A tervezés során megvizsgáljuk, hogy az ingyenesen elérhető Open AI-ChatGPT 4.0 és a Google-Gemini 2.0 verzió mennyire képes támogatni egy ilyen jellegű aerodinamikai tervezési és fejlesztési folyamatot. Törekszünk arra, hogy a szárny által létrehozott leszorító- és közegellenállási erő aránya megfelelő legyen alacsonyabb haladási sebesség esetén. Figyelembe vesszük, hogy a CoP (nyomásközéppont) és CoM (tömegközéppont) egymáshoz képesti viszonya mit eredményez menetdinamikailag. A CAD modell elkészítése SolidWorks használatával történt, a CFD szimulációk elkészítéséhez az Ansys CFD szoftvert használtuk.

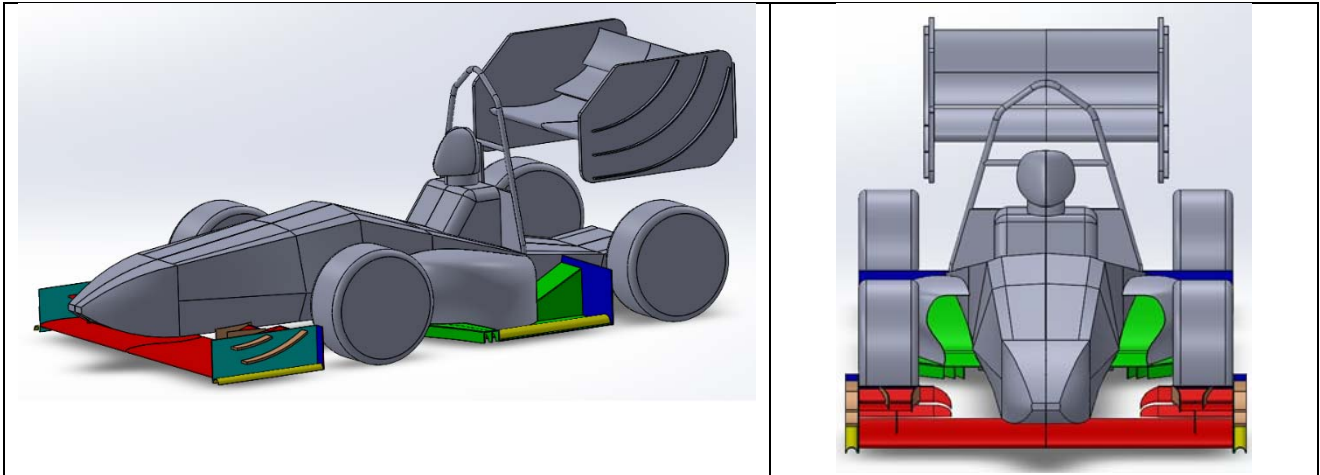
Kulcsszavak: aerodinamika, CAD modell, Open AI, szárny, Venturi-csatorna

1. VERSENYAUTÓK AERODINAMIKÁJA

A versenyautók aerodinamikai elemeinek fejlesztése az 1960-as évek óta jelentős szerepet kap a motorsportban. Eleinte főleg a repüléstechnikából ismert elméletet alkalmazták és elkezdtek különféle profilokat az autókra használni. Ilyen irányú fejlesztések célja a nagyobb kanyartempó és egyben a legjobb egyensúly elérése a különféle pályakarakteristikákon.

A Formula Student versenyautók olyan formula típusú járművek, melyet teljes mértékben hallgatók terveznek, építenek, majd versenyeznek is vele. Európában minden versenyszezonban az éppen aktuális Formula Student Germany versenyszabályzata vonatkozik ezekre a konstrukciókra. Ezeken a versenyeken a pályák szűkek és technikai kihívásokkal rendelkeznek. Ezért az aerodinamikának főleg a mechanikai tapadást kell kiegészítenie, és nem a végsebességre kell fókuszálni. Egy jól megtervezett aerodinamikai csomag főleg a vezethetőséget helyezi előtérbe, tehát javítja a kanyartempót és a stabilitást. Az igazi kihívás a leszorító erő és a légellenállási erő arányának optimális megtalálása, a szükséges hűtő teljesítmény biztosításával. Célul tűztük ki az Óbudai Egyetem harmadik versenyautó (1. ábra) aerodinamikai

csomagjának, ezen belül is az első szárnynak és a Venturi-csatornának a megtervezését. Az első szárny tervezése során a mesterséges intelligencia segítségét és tudását szintén teszteljük. További célként tűztük ki, hogy minél egyszerűbben, olcsóbban legyen gyártható és összeszerelhető minden elem, és az alkatrészek tömege ne növelje jelentősen az autó teljes tömegét.

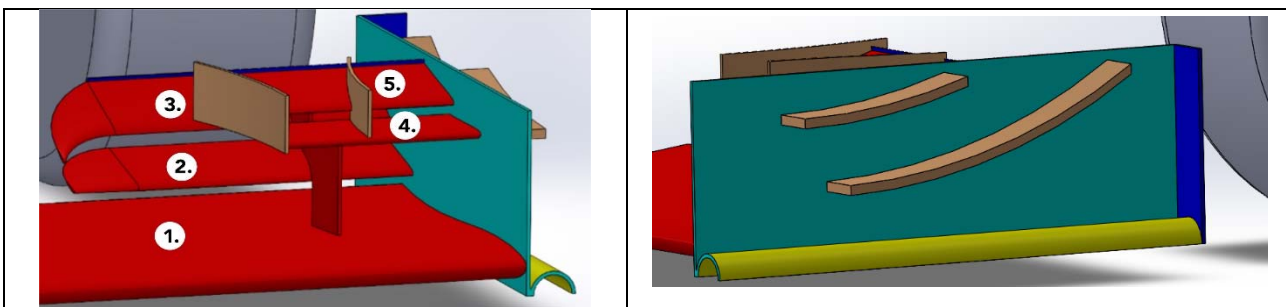


1. ábra OUR 003 aerodinamikai elemei

2. AERODINAMIKAI ELEMOK TERVEZÉSE

A versenyautó első szárnyának kiinduló aerodinamikai koncepciójaként egy 3 szárnylapos megoldást választottunk, amely még kiegészül további terelő elemekkel. Főprofilnak az FX60-100 10.0% smoothed típust, további szárnylapoknak a NACA 4412-es profilt választottuk. Mindkettő az Airfoil Tools weboldalon, a hozzájuk tartozó különféle jellemző függvényekkel megtalálható és a pontsorok letölthetőek, amelyek egyszerűen beilleszthetőek a SolidWorks (CAD) programba. A főprofil (2. ábra 1. számú szárnya) az a profil, amely legközelebb van a talajhoz, húr hossza a legnagyobb, és közvetlen módon befolyásolja az egész szárny működését. Magassága a talajtól számítva 40- 60 mm, ezért a húr hossza 400 mm hosszú, mivel a talajhatás szempontjából a hasmagasság-húr hossz (h/c) arány 0,1-0,3 között kell legyen a legnagyobb leszorító erő érdekében. A NACA 4412-es profilok húr hossza minden esetben 100 mm az egyszerűbb gyártás miatt. A húr hossz annak az egyenesnek a hosszúsága, amely a belépőél és a kilépőél köti össze. A belépőél az a pontsorozat, ahol az áramló közeg először, a kilépőél pedig, ahol utoljára érintkezik a szárnyprofilal. Ez egy szabványosított profil, (National Advisory Committee for Aeronautics-NACA) amely jól kezeli a leválást, ezért további profilként alkalmazva nagyobb támadási szögben is hatékony tud maradni és formája miatt egyszerű gyártani. Az FX profilok alacsony Reynolds-számhoz (alacsony tempó) optimalizált, magas Cl/Cd aránnyal rendelkező modern profilok, melyeket a 20. század második felében fejlesztettek. Ezeket jellemzően nagyságrendileg 10^5 - 10^6 Reynolds-számú környezetben használják. [1, 2, 6] A mi esetünkben az autó átlagtempójánál és tavaszi időszakban az aszfalt 30 °C hőmérséklete esetén:

$$Re = \frac{vl}{\nu} = \frac{15 \frac{m}{s} \times 0,4m}{(16,288 \times 10^{-6}) \frac{m^2}{s}} = 368369$$



2. ábra OUR 003 első szárny és oldallemez

2.1. Oldallemez

Egy oldallemez feladata, hogy ne engedje a profilok felső részén kialakult magas nyomású levegőt a következő profilok alá, ahol alacsony nyomású zóna alakul ki. Ezek az oldallemezek elválasztják ezt a két zónát, így a szárny hatékonyabban működik (2. ábra). A tervezett oldallemezünk hatékonyságának növelése érdekében elláttuk további áramlást irányító elemekkel. Az alsó részén megtalálható egy örvényáramot létrehozó félcső (2. ábra), ami a kerék előtti áramlás irányításában vesz részt és segít a Venturi hatásban. A félcső végén egy Gurney-flap (2. ábra sötétkék rész) irányítja a szárny alól kiáramló levegőt kifelé terelni. A kerekekből származó turbulenciát tompítja az oldallemezen elhelyezett további két terelő.

2.2. Terelő profilok, elemek

Az autó kerékméretéből adódóan további terelő szárnyelemeket terveztünk, amelyek a 2. ábrán láthatóak. A 4. és 5. profil kapott két terelő lemezt, ezek segítenek kifelé, illetve befelé is terelni a levegőt, hogy növeljük a hűtőteljesítményt és minél kevesebb levegő ütközzön a kerekeknek. A 2. és 3. profilok belső oldalán segédzárnyakat alakítottunk ki, hogy elkerüljük a kedvezőtlen örvények kialakulását, és ne kelljen szárnyprofil lezáró véglemezt alkalmaznunk, ezzel is csökkentve a szárny légellenállását. Továbbá a 3. és 5. profilon Gurney-flapeket is használtunk a nagyobb támadási szög elérése érdekében. Az elemek magassága a hozzájuk tartozó profilok húr hosszának 4%-a. [3, 4]

2.3. Leszorítóerő-közegellenállási erő (F_l/F_d) arány

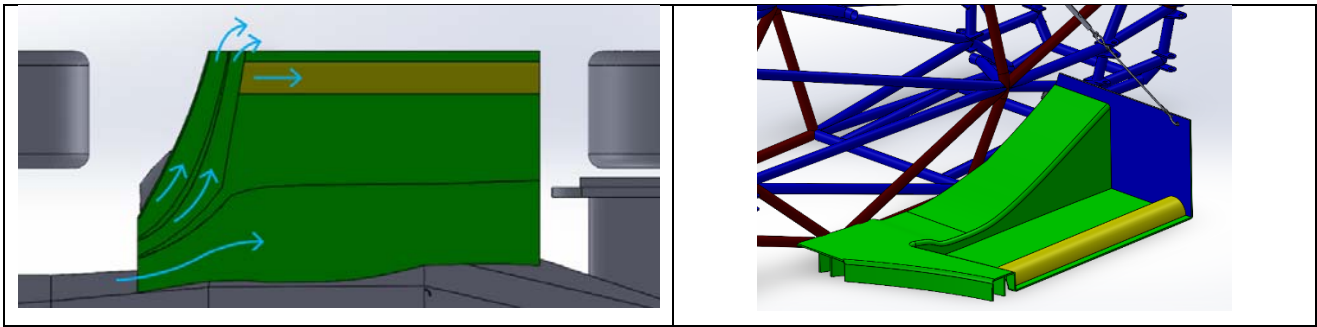
Az első szárny tervezésekor 3 lehetséges változatban gondolkodtunk. Ebből két esetben a szárny két-két főprofilból, több helyen görbe menti vezéregyenes szerint hajlított profilból és több terelő elemből állt volna. Ezek viszont nem jelentettek akkora többlet előnyt a sokkal időigényesebb tervezés és drágább, nehezebben megvalósítható gyártással együtt, ezért jelenleg elvetettük őket. Végül egy olyat választottunk, amely kevesebb elemből és könnyebben legyártható profilokból áll. Döntésünket alátámasztotta az ANSYS CFD szoftverben futtatott szimulációból kapott eredmény, 15 m/s haladási sebességnél $F_l/F_d=11,76$. A kapott érték igazolja, hogy ez a változat alacsony sebességnél is hatékonyan fog hozzájárulni az autó jobb manőverezhetőségéhez.

2.4. Venturi-csatorna

A Venturi-csatornák az autó két oldalán a kerekek között helyezkednek el (3. ábra). Funkciójuk a talajhatás kihasználása. Az oldaldoboz és a hűtés úgy kerül kialakításra, hogy maga a Venturi-csatorna felső felülete adja az oldaldoboz alját. A hűtőradiátor homlokfelülete 220x380 mm. A szabálykönyv szerint az autó ezen részén nem lehet semmilyen elem a talajtól számított 500 mm-nél magasabban, és a hasmagasság legalább 30 mm kell legyen. A kerekek függőleges érintőjétől számítva 75 mm-en belül szintén nem tervezhető semmi. Ezek figyelembevételével törekedtünk arra, hogy minden elférjen és a hűtő is olyan pozícióba kerüljön, hogy az hatékonyan működhessen.

A Venturi-csatorna belépő része két fő irányba tereli a levegőt. A talajhatást kihasználó rész egy rövidebb konfúzor után 63 mm magasságon a legalacsonyabb pont, a torkolat következik, amely után körülbelül a Venturi-csatorna hosszának felétől a diffúzor kezdődik. Az emelkedés egy görbület mentén történik körülbelül 13° hajlásszöggel, ami tovább növekszik. A minél nagyobb kilépő keresztmetszet elérése érdekében egy Gurney-flap került kialakításra. [4]

A másik fő része a Venturi-csatornának egy olyan csatorna, amely a Venturi részt hivatott megóvni a külső beáramlástól. A beáramló levegő egy részét egy örvényáramot generáló félcsőbe tereli, a további légtömeg pedig kilép az autó alól, ami így szintén egy szigetelő örvényt hoz létre. A félcsövet azért így terveztük, mert ha nem az autó és a kerék mellett az első szárnytól beáramló levegőt vezetnénk oda, akkor a kerék turbulenciája miatt nem lenne működőképes. A hátsó kerék előtt szintén kialakítottunk egy nagyobb méretű Gurney-flapet, ami így csökkenti a hátsó kerék által keltett káros örvényeket. [5, 7, 8]



3. ábra OUR 003 Venturi-csatorna

3. MESTERSÉGES INTELLIGENCIA A CAD MODELLEK KÉSZÍTÉSÉBEN

Napjainkban a számítógépes tervezés támogatásaként megfigyelhető a mesterséges intelligencia használata. A két legismertebb és ingyenesen elérhető változat a ChatGPT és a Gemini. A tervezés során teszteltük, hogy valóban van-e létjogosultsága a fejlesztési munka során. Különböző kérdések megválaszolásával képes támogatni a mérnöki munkánkat.

3.1. ChatGPT

A 4.0-s verziója saját memóriával dolgozik, így miután feltesszük neki a kérdéseinket emlékezni fog rá, és a további kérdéseket már nem szükséges úgy feltenni neki, hogy utalunk a témára is, ami nagyon nagy előny. Ezt tudva az első kérdésünk az volt, hogy mi az aerodinamikai elemek funkciója egy formula student típusú versenyautón? Válaszában kitért külön-külön az első-, hátsó szárnyra, az autó oldalára, diffúzorra, padlólemezre és az egyéb légterelőkre is. Írt az egyes elemek céljáról, elhelyezéséről, működéséről, hatásáról a további elemekre és még a kialakításáról, általános felépítéséről is. Megjegyezte, hogy az első szárny célja a „leszorítóerő növelése az első tengelyen, hogy javítsa a tapadást és a kanyarodási teljesítményt”, felépítését tekintve „több elemű szárnyprofil (általában 2-3 lap), amelyek optimalizálják az áramlást”, kihívás az első szárny esetében „a megfelelő egyensúly megtalálása a leszorítóerő és a légellenállás között”. Az aerodinamikai stratégiát úgy határozta meg, hogy fontos a nagy leszorítóerő alacsony sebességnél a minimális légellenállás, a gyorsulás és az energiahatékonyság miatt, és az egész koncepciót optimalizálni kell az autó hűtésére.

A második kérdésünkben megkértük, hogy segítsen egy ilyen autóra első szárnyat tervezni. Itt 7 pontban válaszolt nekünk, amelyek a következők:

- Célok és szabályok meghatározása
- Alapvető aerodinamikai koncepció kidolgozása
- Méretezés és kezdeti számítások
- 3D CAD modellezés
- CFD szimulációk és optimalizáció
- Prototípus gyártása és tesztelése
- Finomhangolás és végső beállítások

Ezekben a pontokban már kitért arra, hogy az ilyen típusú autók milyen sebességtartományban mozognak. A ChatGPT ajánlott különféle profiltípusokat (NACA és Eppler), modellező és szimulációs szoftvereket, megemlítette a szárnyvéglapkialakítás fontosságát. Javaslatot tett, hogy milyen elemek gyártása valósuljon meg 3D nyomtatással és milyen anyagokat használjunk fel a gyártáshoz. Külön kategorizálta az olcsóbb, de nehezebb vagy könnyebb, de költségesebb belső szerkezet, szárny elkészítésének lehetőségeit.

Megkérdeztük, hogy mi a véleménye az FX nevezetű profilokról, használná-e a talajhatás kihasználására? Itt elmondta, hogy különösen jó profilok a Formula Student autókra, mivel az autó átlagsebességéhez tartozó tartományban ($Re=10^5-10^6$) igazán jól működnek és jó a felhajtóerő légellenállás arányuk, és stabil aerodinamikai teljesítményt nyújtanak. Ajánlott különböző profilokat az autó egyes részeire, hogy mely profilok alkalmazhatók az első szárnynál a talajhatás kihasználására és akár a hátsó szárnyhoz, vagy az autó más területeire. Összefoglalta, hogy az ajánlásai közül melyek, miért nem jók a talaj közelében való alkalmazásra. Említettük neki a mi általunk választott főprofil is. Itt hibázott egyet, ugyanis szimmetrikus profilként hivatkozott rá, viszont miután kijavítottuk, hogy az nem az, azután meg is indokolta, hogy hibázott

és bocsánatot kért. Pontos dőlésszög, húrhossz és magasságbeállításokat is ajánlott, ami meglepő volt számunkra, hiszen közel egyeztek az általunk leszimulált adatokkal.

Ezek után azt is megkérdeztük, hogy milyen profilokat ajánlana további elemeknek és mi a véleménye az általunk használt profiról. Válaszában dicsérte a választásunkat, és itt is pontos húrhossz, dőlésszög és távolság beállításokat ajánlott, ahhoz viszonyítva, hogy mekkorák a főprofil egyes értékei. Különböző tartományokat adott, amelyek hatékonyak lehetnek vagy akár már leválást is okozhatnak bizonyos esetekben. Hatékonyságot javító elemként megemlítette a Gurney-flap használatát, és ehhez is írt méreteket és helyeket, ahol hatékonyan tudjuk hasznosítani annak előnyét.

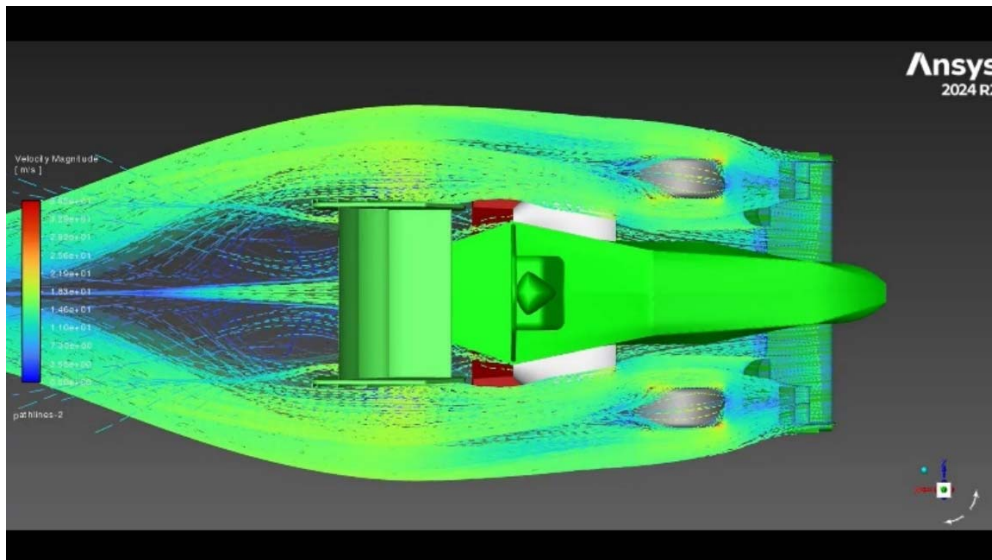
A ChatGPT előnyeként említjük, hogy áramlási kép is feltölthető, amit aztán a nyelvi modell megpróbál kiértékelni. Leírja, hogy mely zónákon fedezhető fel valamilyen örvényképződés, ami akár leválásra is utalhat, és megoldási ötletet is biztosít. A megoldások, amiket egyes helyzetekre ajánlott: csökkentjük a támadási szöveget $2-3^\circ$ -kal, vegyük kisebbre a távolságot bizonyos profilok között vagy például, hogy növeljük a távolságot a talajhoz képest. Ha pedig azt kérjük tőle, hogy indokolja forrásokkal ötleteit, megjelöl szakirodalmakat, ahol megtalálhatók a kapott információk.

3.2. Gemini

A Gemini a ChatGPT-hez képest nem rendelkezik olyan fejlett saját memóriával, így a vele való beszélgetés során többször tudatosítani kell, hogy pontosan milyen témáról is beszélünk. Ugyanazokkal a kérdésekkel próbálkoztunk nála is. Eleinte hasonló válaszokat adott, viszont már kisebb pontossággal és kevesebb konkrétumokkal. Nem tudott profilokat ajánlani. Arra hivatkozott, hogy nincs elérhető adatbázis és inkább azt ajánlotta, hogy beszéljünk hozzáértő szakemberekkel. Az első kérdések után, amikor az FX profilokról kérdeztük ő a „Foreign Exchange” kifejezésre gondolt és a devizakereskedelemtől és befektetési döntésekről kezdett írni. Miután ajánlottunk neki adatbázist és tudatosítottuk benne, hogy pontosan mik ezeket az FX profilok már jobb válaszokat volt képes adni, de olyan komplex megoldásokat és a változtatások utáni hatásokat, mint a másik nyelvi modell nem tudott adni, sem a tervezési, sem a szimulációs, sem a gyártási részekhez.

4. A NYOMÁSKÖZÉPPONT ÉS A TÖMEGKÖZÉPPONT ARÁNYA

Az autó menetdinamikáját erősen befolyásolja és meghatározza a nyomásközéppont és tömegközéppont aránya. Arra törekszünk, hogy a nyomásközéppont (CoP) és a tömegközéppont (CoM) minél közelebb essen egymáshoz. Ezen kívül fontos, hogy a CoP a CoM mögött helyezkedjen el, amivel biztosítjuk a számunkra elvárt bizonyos szintű alulkormányozottságot. Ezzel érjük el az autó stabilitását egy adott féktávon. Ha a CoM a CoP mögött helyezkedne el, alulkormányozottságot érnénk el, amit azért nem szeretnénk, mert fékezéskor az autó átterhelésének következtében a hátsó tengelyen túlságosan lecsökkenő tapadás kiszámíthatatlan módon megcsúszást eredményezne. A tervezés során az előző szezonban versenyzett autó (OUR 002) CoM értékéből indultunk ki, ami az első tengelytől számítva a tengelytáv 52%-nál helyezkedik el, amikor a pilóta is az autóban ül, aki a méréskor 70 kg tömegű volt. A teljes autó tömege pilóta nélkül 280 kg. Az idei szezon autójában a pilóta a korábbihoz képest hátrébb kerül, és a motor pozíciója is változik. További változás még, hogy számolnunk kell az első- és hátsó szárny tömegével. Számításaink szerint az OUR 003 autó CoM értéke 55,5% és 60% közé fog esni. A CoP értékét ANSYS CFD szimuláció készítésével határoztuk meg. Az első szárny tartószerkezete úgy került megtervezésre, hogy dőlésszög állítási lehetőséget nyújtson. A tartószerkezet állítható tervezését azért tartottuk fontosnak, mert így a versenypályán történő tesztek során olyan információkat tudunk gyűjteni, amelyek hozzájárulnak a konstrukció továbbfejlesztéséhez. Szimulációkból kapott eredmények az mutatják, hogy az első szárny állításával a CoP értéke a tengelytávon 58% és 66% közé állítható. Az eredmények szerint a tervezett beállításainkkal biztosítani tudjuk az autó stabilitását és enyhe alulkormányozottságát.



4. ábra OUR 003 áramvonalak

5. ÖSSZEGZÉS

A tervezést követő szimulációs eredményeink alátámasztják, hogy az első szárny hatékonyan hozzá fog járulni az autó irányíthatóságához, és elegendő levegő fog áramolni a hűtőradiátor hatékony működéséhez. A Venturi- csatorna a tervezési céljainknak és a szabálykönyvnek is megfelel. A teljes aerodinamikai csomag, az első szárny állítási lehetőségével egy stabil autót eredményez. A jövőbeli terveink, az első szárny további állásszögekben történő szimulációs vizsgálata, a kialakuló áramlási tér feltérképezése. Az eredmények validálása mérésekkel. Vizsgálatunk alapján kijelenthető, hogy a Google-Gemini 2.0-s verziója még nem olyan fejlett, hogy hatékonyan tudjon információt szolgáltatni, viszont az Open AI-ChatGPT 4.0 verzió képes támogatni egy ilyen jellegű aerodinamikai tervezési és szimulációs folyamatot. Az ingyenes verzió azonban tartalmaz bizonyos korlátozásokat, ami lassítja a fejlesztést.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Joseph Katz, Aerodynamics of race cars, San Diego State University, Department of Aerospace Engineering, 2006
- [2] Airfoil Tools, <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=fx60100sm-il>, 2025.03.07.
- [3] Mattia Basso, Carlo Cravero, Davide Marsano, Aerodynamic Effect of the Gurney Flap on the Front Wing of a F1 Car and Flow Interactions with Car Components, MDPI energies, 2021
- [4] Joseph Katz, Race Car Aerodynamics Designing for Speed, Bentley Publishers, 1996
- [5] Mingus Hokkanen, Aerodynamic Development of a Formula Student Front Wing, Degree Project in Technology, 2024
- [6] Ioannis Oxyzoglou, Design & Development of an Aerodynamic Package for a FSAE Race Car, University of Thessaly Department of Mechanical Engineering, 2017
- [7] Henrik Dahlberg, Aerodynamic development of Formula Student race car, Bachelor Thesis KTH Mechanics, 2014
- [8] Aaron Poutiainen, Undertray Design and Development Procedure with CFD, KTH University, 2021